



同济大学 1907-2017  
Tongji University



同济博士论丛  
TONGJI Dissertation Series

总主编 伍江 副总主编 雷星晖

张艳伟 石来德 宓为建 著

# 集装箱码头混合装卸系统 生产组织关键技术研究

Operations Research on Maritime Container  
Terminal with a Hybrid of Single-Trolley and  
Dual-Forty Feet-Trolley Quay Cranes



同济大学出版社  
TONGJI UNIVERSITY PRESS



同济博士论丛  
TONGJI Dissertation Series

总主编 伍江 副总主编 雷星晖

张艳伟 石来德 宓为建 著

# 集装箱码头混合装卸系统 生产组织关键技术研究

Operations Research on Maritime Container  
Terminal with a Hybrid of Single-Trolley and  
Dual-Forty Feet-Trolley Quay Cranes



同济大学出版社  
TONGJI UNIVERSITY PRESS

## 内 容 提 要

随着集装箱货运量的快速增长和港口竞争的日益加剧,港口经营者面临着更大的机遇和挑战。本书以出口箱堆存与翻箱等集装箱码头关键技术为研究内容,从计划和动态决策两个层面展开深入系统的研究,对实现集装箱码头关键业务的自动化智能决策,促进双40英尺岸桥在集装箱装卸作业中的广泛应用和推广具有一定的实用价值和理论意义。

本书适合高校相关专业师生参考使用。

### 图书在版编目(CIP)数据

集装箱码头混合装卸系统生产组织关键技术研究 /  
张艳伟,石来德,宓为建著. —上海:同济大学出版社,  
2017.8

(同济博士论丛 / 伍江总主编)

ISBN 978-7-5608-7004-5

I. ①集… II. ①张… ②石… ③宓… III. ①集装箱  
码头—港口装卸—生产组织—研究 IV. ①F550.61

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 093885 号

---

---

## 集装箱码头混合装卸系统生产组织关键技术研究

张艳伟 石来德 宓为建 著

出品人 华春荣 责任编辑 张崇豪 熊磊丽

责任校对 徐春莲 封面设计 陈益平

---

出版发行 同济大学出版社 [www.tongjipress.com.cn](http://www.tongjipress.com.cn)

(地址:上海市四平路1239号 邮编:200092 电话:021-65985622)

经 销 全国各地新华书店

排版制作 南京展望文化发展有限公司

印 刷 浙江广育爱多印务有限公司

开 本 787 mm×1092 mm 1/16

印 张 16.5

字 数 330 000

版 次 2017年8月第1版 2017年8月第1次印刷

书 号 ISBN 978-7-5608-7004-5

---

定 价 76.00 元

---

本书若有印装质量问题,请向本社发行部调换 版权所有 侵权必究

此为试读,需要完整PDF请访问: [www.ertongbook.com](http://www.ertongbook.com)

# “同济博士论丛”编写领导小组

组 长：杨贤金 钟志华

副 组 长：伍 江 江 波

成 员：方守恩 蔡达峰 马锦明 姜富明 吴志强  
徐建平 吕培明 顾祥林 雷星晖

办公室成员：李 兰 华春荣 段存广 姚建中

# “同济博士论丛”编辑委员会

总 主 编：伍 江

副 总 主 编：雷星晖

编委会委员：（按姓氏笔画顺序排列）

丁晓强	万 钢	马卫民	马在田	马秋武	马建新
王 磊	王占山	王华忠	王国建	王洪伟	王雪峰
尤建新	甘礼华	左曙光	石来德	卢永毅	田 阳
白云霞	冯 俊	吕西林	朱合华	朱经浩	任 杰
任 浩	刘 春	刘玉擎	刘滨谊	闫 冰	关侗红
江景波	孙立军	孙继涛	严国泰	严海东	苏 强
李 杰	李 斌	李风亭	李光耀	李宏强	李国正
李国强	李前裕	李振宇	李爱平	李理光	李新贵
李德华	杨 敏	杨东援	杨守业	杨晓光	肖汝诚
吴广明	吴长福	吴庆生	吴志强	吴承照	何晶晶
何敏娟	何清华	汪世龙	汪光焘	沈明荣	宋小冬
张 旭	张亚雷	张庆贺	陈 鸿	陈小鸿	陈义汉
陈飞翔	陈以一	陈世鸣	陈艾荣	陈伟忠	陈志华
邵嘉裕	苗夺谦	林建平	周 苏	周 琪	郑军华
郑时龄	赵 民	赵由才	荆志成	钟再敏	施 骞
施卫星	施建刚	施惠生	祝 建	姚 熹	姚连璧

袁万城 莫天伟 夏四清 顾 明 顾祥林 钱梦騷  
徐 政 徐 鉴 徐立鸿 徐亚伟 凌建明 高乃云  
郭忠印 唐子来 閻耀保 黄一如 黄宏伟 黄茂松  
戚正武 彭正龙 葛耀君 董德存 蒋昌俊 韩传峰  
童小华 曾国荪 楼梦麟 路秉杰 蔡永洁 蔡克峰  
薛 雷 霍佳震

秘书组成员：谢永生 赵泽毓 熊磊丽 胡晗欣 卢元姗 蒋卓文

# 总序

在同济大学 110 周年华诞之际，喜闻“同济博士论丛”将正式出版发行，倍感欣慰。记得在 100 周年校庆时，我曾以《百年同济，大学对社会的承诺》为题作了演讲，如今看到付梓的“同济博士论丛”，我想这就是大学对社会承诺的一种体现。这 110 部学术著作不仅包含了同济大学近 10 年 100 多位优秀博士研究生的学术科研成果，也展现了同济大学围绕国家战略开展学科建设、发展自我特色，向建设世界一流大学的目标迈出的坚实步伐。

坐落于东海之滨的同济大学，历经 110 年历史风云，承古续今、汇聚东西，秉持“与祖国同行、以科教济世”的理念，发扬自强不息、追求卓越的精神，在复兴中华的征程中同舟共济、砥砺前行，谱写了一幅幅辉煌壮美的篇章。创校至今，同济大学培养了数十万工作在祖国各条战线上的人才，包括人们常提到的贝时璋、李国豪、裘法祖、吴孟超等一批著名教授。正是这些专家学者培养了一代又一代的博士研究生，薪火相传，将同济大学的科学研究和学科建设一步步推向高峰。

大学有其社会责任，她的社会责任就是融入国家的创新体系之中，成为国家创新战略的实践者。党的十八大以来，以习近平同志为核心的党中央高度重视科技创新，对实施创新驱动发展战略作出一系列重大决策部署。党的十八届五中全会把创新发展作为五大发展理念之首，强调创新是引领发展的第一动力，要求充分发挥科技创新在全面创新中的引领作用。要把创新驱动发展作为国家的优先战略，以科技创新为核心带动全面创新，以体制机制改

革激发创新活力,以高效率的创新体系支撑高水平的创新型国家建设。作为人才培养和科技创新的重要平台,大学是国家创新体系的重要组成部分。同济大学理当围绕国家战略目标的实现,作出更大的贡献。

大学的根本任务是培养人才,同济大学走出了一条特色鲜明的道路。无论是本科教育、研究生教育,还是这些年摸索总结出的导师制、人才培养特区,“卓越人才培养”的做法取得了很好的成绩。聚焦创新驱动转型发展战略,同济大学推进科研管理体系改革和重大科研基地平台建设。以贯穿人才培养全过程的一流创新创业教育助力创新驱动发展战略,实现创新创业教育的全覆盖,培养具有一流创新力、组织力和行动力的卓越人才。“同济博士论丛”的出版不仅是对同济大学人才培养成果的集中展示,更将进一步推动同济大学围绕国家战略开展学科建设、发展自我特色、明确大学定位、培养创新人才。

面对新形势、新任务、新挑战,我们必须增强忧患意识,扎根中国大地,朝着建设世界一流大学的目标,深化改革,勠力前行!

万 钢

2017年5月

# 论丛前言

承古续今，汇聚东西，百年同济秉持“与祖国同行、以科教济世”的理念，注重人才培养、科学研究、社会服务、文化传承创新和国际合作交流，自强不息，追求卓越。特别是近20年来，同济大学坚持把论文写在祖国的大地上，各学科都培养了一大批博士优秀人才，发表了数以千计的学术研究论文。这些论文不但反映了同济大学培养人才能力和学术研究的水平，而且也促进了学科的发展和国家的建设。多年来，我一直希望能有机会将我们同济大学的优秀博士论文集中整理，分类出版，让更多的读者获得分享。值此同济大学110周年校庆之际，在学校的支持下，“同济博士论丛”得以顺利出版。

“同济博士论丛”的出版组织工作启动于2016年9月，计划在同济大学110周年校庆之际出版110部同济大学的优秀博士论文。我们在数千篇博士论文中，聚焦于2005—2016年十多年间的优秀博士学位论文430余篇，经各院系征询，导师和博士积极响应并同意，遴选出近170篇，涵盖了同济的大部分学科：土木工程、城乡规划学(含建筑、风景园林)、海洋科学、交通运输工程、车辆工程、环境科学与工程、数学、材料工程、测绘科学与工程、机械工程、计算机科学与技术、医学、工程管理、哲学等。作为“同济博士论丛”出版工程的开端，在校庆之际首批集中出版110余部，其余也将陆续出版。

博士学位论文是反映博士研究生培养质量的重要方面。同济大学一直将立德树人作为根本任务，把培养高素质人才摆在首位，认真探索全面提高博士研究生质量的有效途径和机制。因此，“同济博士论丛”的出版集中展示同济大

学博士研究生培养与科研成果,体现对同济大学学术文化的传承。

“同济博士论丛”作为重要的科研文献资源,系统、全面、具体地反映了同济大学各学科专业前沿领域的科研成果和发展状况。它的出版是扩大传播同济科研成果和学术影响力的重要途径。博士论文的研究对象中不少是“国家自然科学基金”等科研基金资助的项目,具有明确的创新性和学术性,具有极高的学术价值,对我国的经济、文化、社会发展具有一定的理论和实践指导意义。

“同济博士论丛”的出版,将会调动同济广大科研人员的积极性,促进多学科学术交流、加速人才的发掘和人才的成长,有助于提高同济在国内外的竞争力,为实现同济大学扎根中国大地,建设世界一流大学的目标愿景做好基础性工作。

虽然同济已经发展成为一所特色鲜明、具有国际影响力的综合性、研究型大学,但与世界一流大学之间仍然存在着一定差距。“同济博士论丛”所反映的学术水平需要不断提高,同时在很短的时间内编辑出版110余部著作,必然存在一些不足之处,恳请广大学者,特别是有关专家提出批评,为提高同济人才培养质量和同济的学科建设提供宝贵意见。

最后感谢研究生院、出版社以及各院系的协作与支持。希望“同济博士论丛”能持续出版,并借助新媒体以电子书、知识库等多种方式呈现,以期成为展现同济学术成果、服务社会的一个可持续的出版品牌。为继续扎根中国大地,培育卓越英才,建设世界一流大学服务。

伍 江

2017年5月

# 前 言

随着集装箱货运量的快速增长和港口竞争的日益加剧,港口经营者面临着更大的机遇和挑战。如何在既定的自然条件、政策法规、先进的设备设施和装卸工艺条件下,通过各作业环节的合理组织和管理,最大限度地发挥作业系统的整体效率,是提高集装箱码头物流能力和服务质量的关键所在。另一方面,由于船舶具体到达时间、外卡到港规律、港内交通实况、机械设备的实际作业效率、预到港进出口箱的信息等均具有一定的不确定性和随机性,以及各子系统间的复杂耦合和相互动态作用,致使集装箱码头的生产组织十分复杂。虽然国内外对集装箱码头生产管理难题进行了一定程度的研究,并出现了用于生产实际的管理信息系统,但相关研究仍存在深度不足、缺乏对不确定因素和干扰的应对能力等局限。对集装箱码头作业系统和关键业务进行更深入和细致的研究势在必行。

集装箱码头生产营运主要涉及出口箱、进口箱和中转箱作业。对于出口箱来说,从港外分散进场→堆场暂存→集中装船的作业过程可看作约束和冲突逐步增强的过程;与出口箱相反,进口箱的物流过程可看作约束和冲突逐步松弛的过程;而集中卸船后在堆场暂存,待二程船到港后集中装船的中转箱,其业务一定程度上具有进出口箱业务的综合特性。为此,可以说,集装箱码头作业系统中出口箱业务最为复杂。出口箱业务主要涉及堆场堆存和翻箱、船舶配载与发箱序列决策、设备配置与调度等几大方面。其中,集港计划、箱位动态分配、翻箱决策等与堆场空间资源分配相关的业务是出口箱业

务中最基础和核心的环节。合理的堆场状态和高效的翻箱方案,有利于提高作业效率,可为船舶配载和装船时设备的调度奠定良好的基础;无序的堆存状态和较劣的翻箱方案,会使作业效率下降,甚至导致设备调度困难,即使对发箱顺序和设备调度策略进行优化也无法保证装船流畅性的现象。考虑到出口箱业务的复杂性及出口箱堆场堆存与翻箱等核心决策的重要性,本书以出口箱堆存与翻箱等集装箱码头关键技术为研究内容,从计划和动态决策两个层面展开深入系统的研究。

针对亚洲特别是中国各大型集装箱港口广泛采用的“岸桥—轮胎吊—集卡”装卸工艺,考虑到近年出现的新型双40英尺岸桥对集装箱码头生产组织带来的新挑战,本书以岸边配备有常规岸桥和双40岸桥2种机型、堆场配备轮胎吊、集卡为水平运输设备的混合装卸系统为研究对象,以出口箱堆场空间资源分配业务为研究主线,主要就集港计划、出口箱具体箱位动态分配、装船前位内预翻箱、装船时位内被动翻箱等,直接影响设备调度环境和出口箱装船组织的核心决策及决策信息流进行深入研究。旨在解决集装箱码头生产实际中存在的出口箱堆存不够合理、翻箱效率低,甚至造成装船时场桥无法合理调度,严重影响船舶作业效率的问题。同时,为多层直接堆垛集装箱码头实现自动化,以及双40英尺岸桥在集装箱码头作业系统中特别是复杂的出口箱装船作业中发挥既定的效率提供一定的科学手段。

本书涉及的决策问题可分为:与整个系统或多个子系统存在较大关联,且相关因素具有较大随机性的“大问题”;较具体的“局部问题”。其中,集港计划和出口箱箱位分配的智能多级堆存问题属于“大问题”范畴,相关因素涉及范围广,各因素多具有一定的随机性和不确定性,且相互之间存在动态作用,通过精确计算很难得到问题的解。对于此类问题的研究,本书提出问题的数学描述、决策信息流描述和系统仿真相结合的技术路线。其中,抽象的数学描述利于理清相关目标的影响因素;信息流描述便于系统直观地认知各因素的数据来源及相互之间的数据交互关系;而系统仿真在影响因素和决策

信息流已明确的基础上,从更具体的层面对实际系统进行模拟,从统计和概率的角度对相应的方案、方法或策略进行性能评价,最终达到解决问题的目的。而对于倍位内翻箱决策等“局部问题”,针对问题的大规模组合特性,本书对模型的合理描述及相应的求解方法进行了深入的研究,尤其注重问题自身启发信息的有效利用和优化算法的合理设计,保证以尽量小的计算代价得到满足工程实际需求的较优决策方案。优化模型和求解方法经计算机编程和大量实例计算验证有效后,可与集港计划方案等“大问题”决策一起嵌入系统仿真模型中,以便系统整体性能的评价。

本书共分8章,主要包括常规岸桥及双40英尺岸桥作业系统的出口箱集港计划、出口箱智能多级分类堆存体系的构建及具体箱位的分配、出口箱装船前预翻箱和装船时被动翻箱方案的优化、堆场关键决策信息流的描述及码头生产系统仿真等。涉及复杂随机离散系统和大规模组合问题的研究,采用了数学建模方法、蚁群优化算法描述、决策流程 Petri 网、系统仿真等技术手段。相关数学模型描述和求解方法、技术路线等适用于堆场为多排多层直接堆垛的自动化或非自动化集装箱码头。部分研究成果,如:倍位内翻箱优化决策等,也适用于与集装箱具有相似堆垛特点的木箱、托盘等物流系统。本书的研究对实现集装箱码头关键业务的自动化智能决策,促进双40英尺岸桥在集装箱装卸作业中的广泛应用和推广具有一定实用价值和理论意义。同时为探索复杂离散随机系统和大规模组合优化问题的研究手段提供了一定的理论支持。

# 目 录

总序

论丛前言

前言

第 1 章 引言	1
1.1 研究背景	1
1.2 问题提出	4
1.3 问题描述	5
1.3.1 研究对象的界定	5
1.3.2 研究问题的描述分析	8
1.4 国内外研究动态	12
1.4.1 出口箱场箱位分配	13
1.4.2 堆场转堆及翻箱决策	15
1.4.3 大规模组合优化问题求解方法	16
1.4.4 仿真技术在集装箱码头生产系统研究中的应用	17
1.5 本书研究的目的和意义	19
1.5.1 研究目的	19
1.5.2 研究的实际价值与理论意义	19
1.6 研究内容、结构及创新点	20
1.6.1 研究内容与本书结构	20
1.6.2 本书的创新点	22
1.7 本章小结	22

<b>第 2 章</b>	<b>出口箱集港堆存计划</b>	23
2.1	问题描述与分析	23
2.1.1	集港箱的信息特征	24
2.1.2	滚动式计划策略的确定	26
2.2	问题解决思路	27
2.2.1	相关假设	27
2.2.2	集港计划的决策内容及目标	29
2.2.3	解决问题的技术路线	30
2.3	堆场区段分配计划模型构建	31
2.3.1	面向船舶的集港箱堆场区段分配计划	31
2.3.2	面向箱组的集港箱堆场区段匹配计划	39
2.4	堆场倍位计划模型构建	43
2.5	本章小结	50
<b>第 3 章</b>	<b>出口箱堆存箱位动态分配</b>	51
3.1	问题描述与分析	51
3.2	智能多级分类堆存体系构建	53
3.2.1	出口箱分类堆存级别的划分	54
3.2.2	智能多级分类堆存体系的建立	55
3.3	多级分类堆存体系中 2 种典型的分类堆存研究	57
3.3.1	适合双 40 英尺岸桥作业的具体箱位动态分配	58
3.3.2	重压轻策略下具体箱位的动态分配	66
3.4	本章小结	75
<b>第 4 章</b>	<b>出口箱装船前位内预翻箱优化决策</b>	76
4.1	问题描述与分析	76
4.1.1	出口箱装船前整理作业的分类	77
4.1.2	位内预翻箱问题的特征分析	78
4.1.3	倍位状态的有效表达	80
4.2	倍位目标状态的确定	81
4.2.1	事先确定目标状态的必要性	81
4.2.2	基于启发信息的目标状态的确定	82

4.3	翻箱方案的优化决策 .....	84
4.3.1	方案搜索过程中无效翻箱的控制 .....	85
4.3.2	方案形成后翻箱序列的进一步优化 .....	89
4.3.3	翻箱方案优化决策流程 .....	95
4.4	位内预翻箱智能决策系统的实现 .....	96
4.4.1	“启发式深度优先”算法的设计 .....	96
4.4.2	位内预翻箱智能决策系统 .....	97
4.5	本章小结 .....	103
<b>第5章</b>	<b>装船时位内翻箱优化决策 .....</b>	<b>105</b>
5.1	问题描述与分析 .....	105
5.2	优化决策数学模型 .....	107
5.2.1	模型框架 .....	107
5.2.2	约束条件及处理方法 .....	109
5.2.3	优化数学模型的构建 .....	110
5.3	装船时翻箱智能决策系统的实现 .....	112
5.3.1	“启发式深度优先”算法设计 .....	112
5.3.2	实例求解及结果分析 .....	113
5.4	位内翻箱优化决策的蚁群算法描述 .....	121
5.4.1	蚁群算法的解空间结构 .....	122
5.4.2	翻箱问题混合层状解构造图的构建 .....	124
5.4.3	蚁群优化算法的设计 .....	126
5.5	本章小结 .....	128
<b>第6章</b>	<b>出口集装箱层次 workflow Petri 网建模 .....</b>	<b>130</b>
6.1	基于 Petri 网的工作流建模方法 .....	131
6.1.1	工作流技术 .....	131
6.1.2	工作流 Petri 网描述 .....	134
6.1.3	工作流 Petri 网正确性验证 .....	137
6.2	出口箱决策业务流程描述与分析 .....	138
6.2.1	集装箱码头出口箱业务系统 .....	138
6.2.2	出口箱堆场决策业务流程 .....	139

6.3	出口箱决策业务层次工作流 Petri 网构建 .....	146
6.3.1	出口箱工作流 Petri 网顶层结构 .....	146
6.3.2	工作流 Petri 网顶层结构正确性分析 .....	148
6.3.3	出口箱堆场工作流子网描述与分析 .....	149
6.4	本章小结 .....	152
<b>第7章</b>	<b>集装箱堆场生产组织仿真 .....</b>	<b>153</b>
7.1	离散系统仿真及仿真环境选取 .....	154
7.2	仿真模型构建与实验设计思路 .....	155
7.3	仿真模型的基本数据 .....	156
7.3.1	船舶、外卡和集装箱产生模块 .....	161
7.3.2	泊位和岸桥分配模块 .....	161
7.3.3	出口箱集港模块 .....	162
7.3.4	进口箱进场及提箱模块 .....	164
7.3.5	场桥和内卡调度模块 .....	165
7.4	集装箱码头系统仿真模型的实现 .....	166
7.5	仿真结果输出与分析 .....	171
7.5.1	仿真模型输出指标设计 .....	171
7.5.2	仿真模型实验设计 .....	172
7.5.3	方案仿真及仿真结果分析 .....	174
7.6	本章小结 .....	178
<b>第8章</b>	<b>结论与展望 .....</b>	<b>179</b>
	<b>参考文献 .....</b>	<b>182</b>
	<b>附录 A 装船前预翻箱智能决策系统部分程序代码 .....</b>	<b>190</b>
	<b>附录 B 装船时翻箱智能决策系统部分程序代码 .....</b>	<b>218</b>
	<b>后记 .....</b>	<b>244</b>